

1. SKLOPOVI S DIODAMA

Poluvodičke diode su elektroničke komponente s dvije elektrode, različitih izvedbi, svojstava i namjena. U ovom poglavlju opisane su dioda opće namjene (u stručnoj literaturi susreće se naziv ispravljačka dioda, engl. rectifier diode, njem. Gleichrichterdiode), Zenerova, tunelska i kapacitivna dioda. Višeslojne diode opisane su u poglavlju 9. *Sklopovi s tiristorima i jednospojnim tranzistorom*, a fotodioda, svijetleća i laserska dioda u poglavlju 10. *Optoelektronički elementi*.

Načela djelovanja dioda poznata su čitatelju od prije iz predmeta ELEKTROTEHNIČKI MATERIJALI I KOMPONENTE. Stoga su ovdje ukratko opisana osnovna svojstva dioda proširena sa znanjima o tehničkim podacima važnim za uporabu. Glavni dio čine prikazi izvedbi, svojstava i primjene sklopova s diodama.

Ovo poglavlje ima četiri dijela. U prvom su dijelu opisana svojstva dioda opće namjene. U sljedeća dva su opisane izvedbe, svojstva i primjene ispravljačkih sklopova te ograničavača i restauratora napona. U posljednjem dijelu dan je prikaz svojstava i osnovne primjene Zenerove, tunelske i kapacitivne diode.

1.1. Svojstva dioda

Propusno polarizirana dioda

Zaporno polarizirana dioda

Strujno-naponska karakteristika diode

Karakteristične veličine diode

1.2. Ispravljački sklopovi

Poluvalni ispravljač

Punovalni ispravljač

Filtriranje ispravljenoga napona

Udvostručivač napona

Umnoživač napona

1.3. Diodni ograničavači i restauratori

Paralelni diodni ograničavači

Serijski diodni ograničavači

Dvostrani diodni ograničavač

Restauratori

1.4. Ostale vrste dioda

Zenerova dioda

Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom

Tunelska dioda

Kapacitivna dioda

Pregled ključnih pojmova

Dodatna literatura za učenike

Zadaci za laboratorijske vježbe

Vježba 1.1. Poluvalni ispravljač

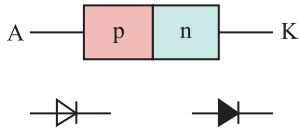
Vježba 1.2. Punovalni ispravljač

Vježba 1.3. Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom

Pitanja i zadaci za ponavljanje i provjeru znanja

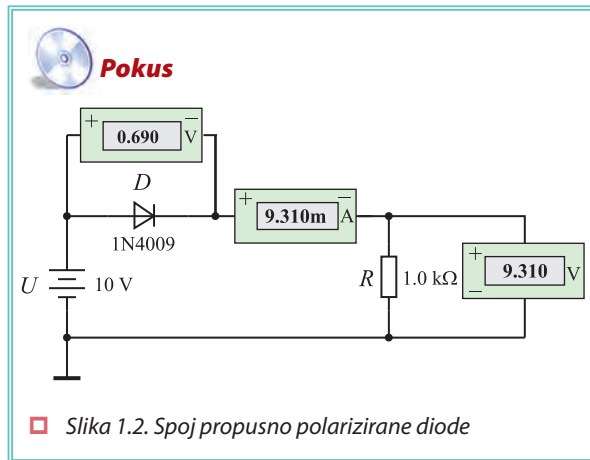
1.1. SVOJSTVA DIODA

Diode opće namjene (ispravljačke diode) sastoje se od p -tipa i n -tipa poluvodiča. Izvod povezan s p -tipom poluvodiča je **anoda** (A), a izvod povezan s n -tipom je **katoda** (K). Mogu biti silicijske i germanijske. Imaju svojstvo da u jednome smjeru propuštaju struju, a u drugom ne.



□ Slika 1.1. Građa i simboli diode

Propusno polarizirana dioda



□ Slika 1.2. Spoj propusno polarizirane diode

Kad je anoda na pozitivnijem potencijalu od katode, za diodu se kaže da je propusno polarizirana. U tom slučaju kroz diodu teče **propusna struja** I_F (engl. forward current, njem. Durchlassstrom) od anode prema katodi. Na diodi je mali pad napona koji za silicijske diode iznosi oko 0,7 V, a za germanijske diode oko 0,3 V (slika 1.2.).

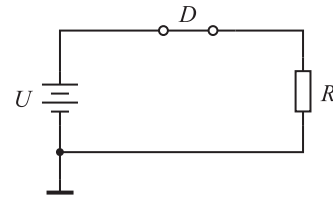
Veličina struje, koja teče kroz propusno polariziranu diodu, ovisi o priključenomu naponu U i otporu R otpornika spojenog u seriju s diodom:

$$I_D = I_F = \frac{U - U_D}{R}.$$

Dioda ima vrlo mali otpor pa je napon $U_D = U_F$ na diodi mali. Stoga je gotovo sav napon U priključenog izvora na otporu R , pa struja kroz diodu približno iznosi:

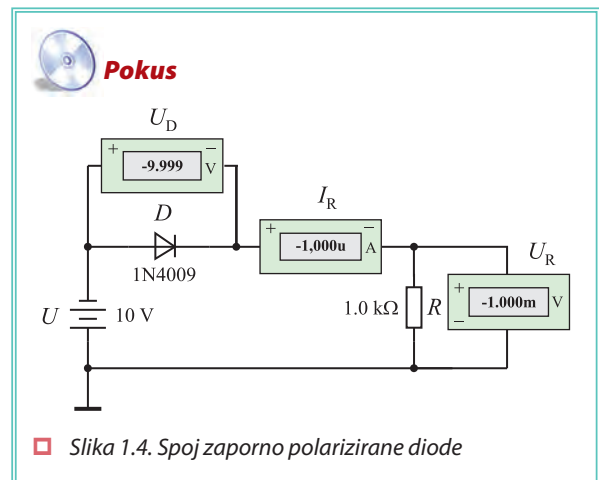
$$I_D = I_F = \frac{U}{R}.$$

Stoga se može reći da dioda djeluje kao uključena sklopka (slika 1.3.).



□ Slika 1.3. Djelovanje propusno polarizirane diode

Zaporno polarizirana dioda

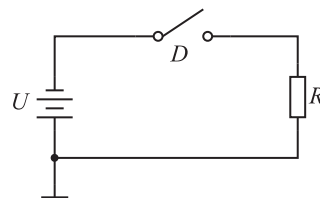


□ Slika 1.4. Spoj zaporno polarizirane diode

Kad je katoda na pozitivnijem potencijalu od anode, dioda je zaporno (nepropusno) polarizirana (slika 1.4.). Kroz diodu teče u smjeru od katode prema anodi vrlo mala struja I_R koja se naziva **zaporna** ili **reverzna struja** (preostala struja, engl. reverse current, njem. Sperrstrom). Zaporna struja za germanijske diode reda je veličine desetak mikroampera, a za silicijske desetak nanoampera.

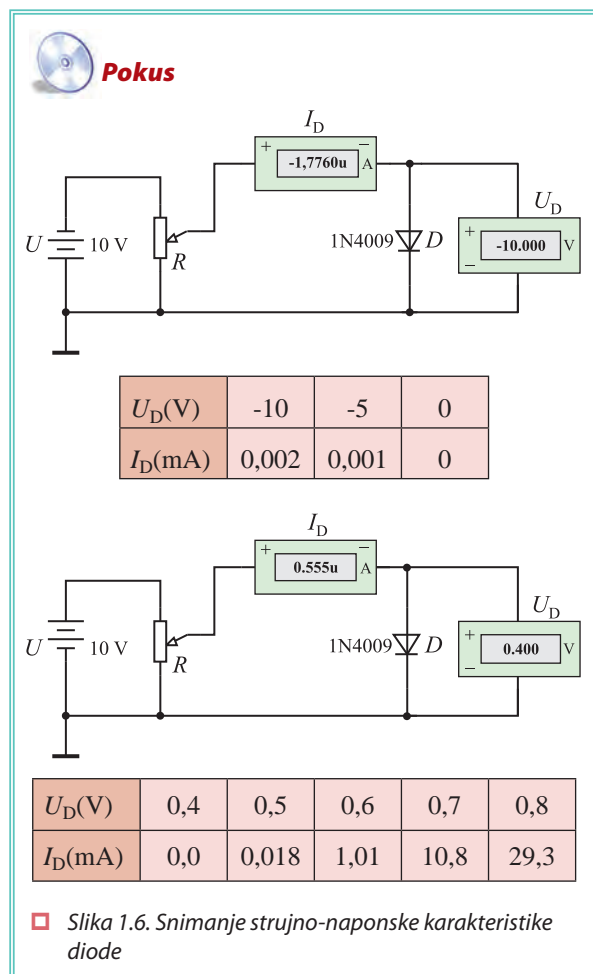
U serijskom spoju zaporno polarizirane diode i otpornika R zaporna struja diode može se zanemariti. Stoga se može zanemariti i pad napona na otporniku R . Zaporni napon na diodi (engl. reverse voltage, njem. Sperrspannung) jest napon U priključenog izvora. Dioda djeluje praktično kao isključena sklopka (slika 1.5.).

$$I_D = I_R = 0 \quad U_D = U = 0$$

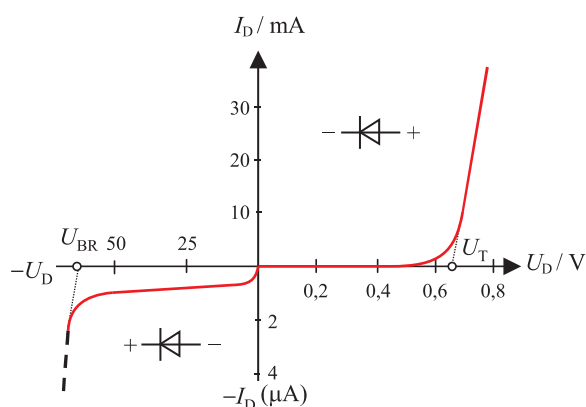


□ Slika 1.5. Zaporno polarizirana dioda djeluje kao isključena sklopka

Strujno-naponska karakteristika diode



Grafički prikaz odnosa napona i struje diode naziva se **strujno-naponska karakteristika diode** (slika 1.7.). Dioda postaje vodljiva kad priključeni napon propusne polarizacije dostigne iznos U_T . Taj napon naziva se **napon praga** ili **napon koljena** (engl. threshold voltage, knee voltage, njem. Schwellspeisung, Schleusenspannung) i za silicijske diode iznosi oko 0,6 V-0,7 V, a za germanijske diode 0,2 V-0,3 V.



Ako priključeni napon zaporne polarizacije prijeđe vrijednost U_{BR} , koja se naziva **probojni napon** (engl. breakdown reverse voltage, njem. Durchbruch-spannung), dolazi do nagloga porasta reverzne struje, što može proizročiti uništenje diode. Iznos probojnoga napona za diode kreće se u rasponu od nekoliko desetaka volta do nekoliko kilovolta.

Karakteristične veličine diode

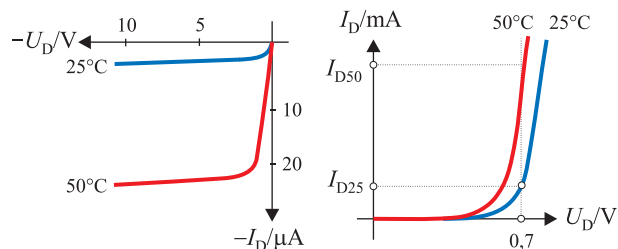
Najvažnije karakteristične veličine diode jesu:

- **dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije** U_R koja se smije priključiti na diodu a da ne dođe do njezina trajnog oštećenja
- **dopuštena jakost struje** I_F koja smije teći kroz diodu pri propusnoj polarizaciji a koja neće uzrokovati trajno oštećenje diode
- **dopušteni utrošak snage** P_{tot}
- **temperaturno područje rada**
- **oblik kućišta i raspored izvoda.**



□ Slika 1.8. Primjeri izvedbi dioda

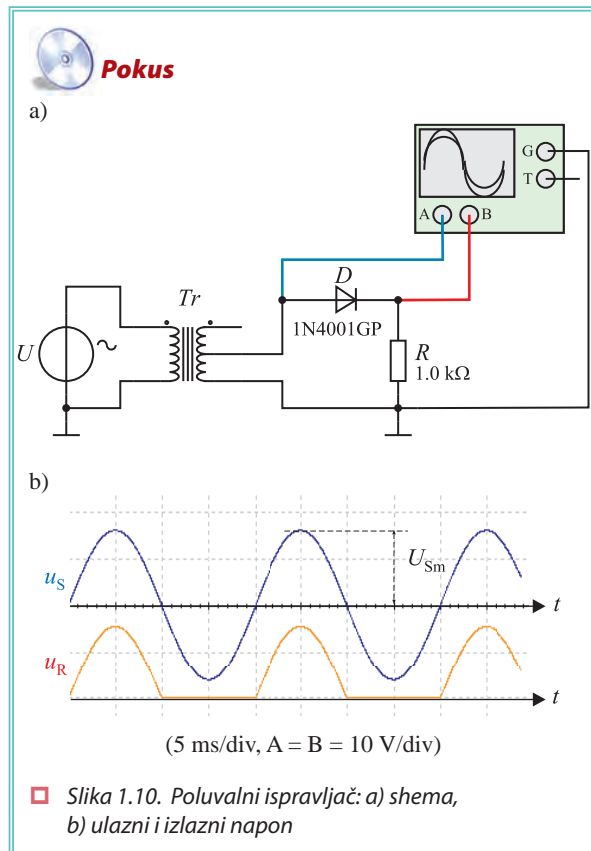
Dopušteni zaporni napon silicijskih dioda iznosi od nekoliko desetaka pa do tisuću volta. Dopuštene jakosti struja dioda iznose od nekoliko desetaka miliampera do nekoliko kiloampera. Utjecaj temperature na karakteristike diode pokazan je na slici 1.9. U tvorničkim podacima karakteristične veličine dioda uvijek se daju za određeno područje temperatura.



1.2. ISPRAVLJAČKI SKLOPOVI

Za normalan rad elektronički sklopovi trebaju istosmjerni napon napajanja. U tu se svrhu izmjenični napon mreže transformira na potrebnu vrijednost i zatim ispravlja. Ispravljanje se obavlja spojevima ispravljačkih dioda koji se nazivaju ispravljački sklopovi, kraće ispravljači (engl. rectifier circuits, njem. Gleichrichterschaltungen). Ispravljački spojevi mogu biti poluvalni i punovalni. Za dobivanje visokih napona s pomoću niskonaponskih elemenata upotrebljavaju se umnoživači napona (engl. voltage multipliers, njem. Spannungsvervielfacher).

Poluvalni spoj ispravljača



Poluvalni spoj ispravljača (engl. halfwave rectifier, njem. Einweggleichrichter) najjednostavniji je ispravljački spoj. Dioda propušta struju samo za vrijeme jedne poluperiode izmjeničnoga napona. Za spoj na slici 1.10.a) to je pozitivna poluperioda. Stoga se na trošilu javlja samo pozitivni dio izmjeničnoga napona (slika 1.10.b). Srednja vrijednost izlaznoga napona ispravljača (istosmjerna komponenta), uz zanemareni pad napona na diodi, iznosi:

$$U_{sr} = \frac{U_{Sm}}{\pi} = 0,45 U_S$$

gdje su U_{Sm} i U_S vršna, odnosno efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora, tj. na ulazu ispravljača. Dopusštena vrijednost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od U_{Sm} .

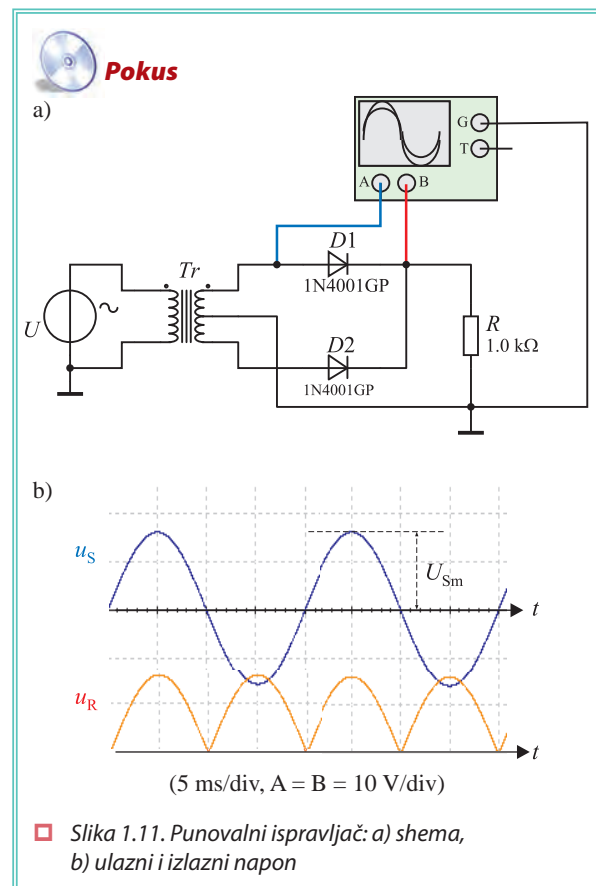
Primjer 2.1.

Koliki mora biti najmanje dopušteni napon zaporne polarizacije diode ako je sklop sa slike 1.10. priključen na mrežni napon uz prijenosni omjer transformatora 10:1?

$$U_R > U_{Sm} = \frac{230}{10} \sqrt{2} = 32,53 \text{ V}$$

Punovalni spoj ispravljača

Znatno bolja svojstva imaju punovalni ispravljači. To su spoj s dvije diode (slika 1.11.) i mosni ili Graetzov spoj (slika 1.12.).



U spoju s dvije diode (engl. fullwave rectifier using a center-tapped transformer, njem. Mittelpunktgleichrichter) za vrijeme pozitivne poluperiode napona na sekundaru transformatora vodljiva je dioda $D1$, a za vri-

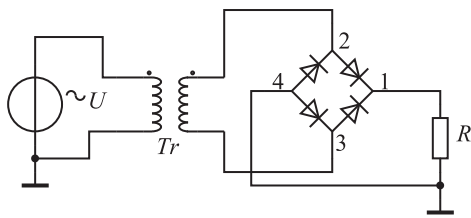
jeme negativne poluperiode dioda $D2$. Struja teče kroz trošilo uvijek u istom smjeru pa se na njemu dobije pozitivan napon u obje poluperiode.

Srednja vrijednost napona na izlazu ispravljača (istosmjerna komponenta), uz zanemareni pad napona na diodi, iznosi:

$$U_{sr} = 2 \frac{U_{Sm}}{\pi} = 0,9 U_S,$$

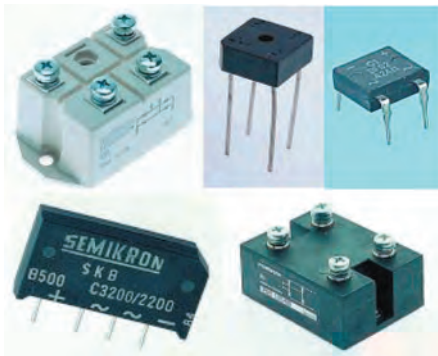
gdje su U_{Sm} i U_S vršna, odnosno efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora (napon gornjeg ili donjeg izvoda prema srednjem izvodu), tj. na ulazu ispravljača. Dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od $2U_{Sm}$.

Isti oblik napona dobije se s pomoću ispravljača u mosnome spoju (Graetzov spoj, engl. bridge rectifier, njem. Brückenschaltung). U_{Sm} je vršna, a U_S efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora, tj. na ulazu ispravljača. Dopuštena vrijednost napona zaporne polarizacije diode mora biti veća od U_{Sm} . Spoj zahtijeva četiri diode ali je transformator jednostavniji.



□ Slika 1.12. Mosni spoj punovalnog ispravljača

Proizvođači poluvodičkih elemenata proizvode oba spoja ispravljača kao element u jednom kućištu (slika 1.13.).

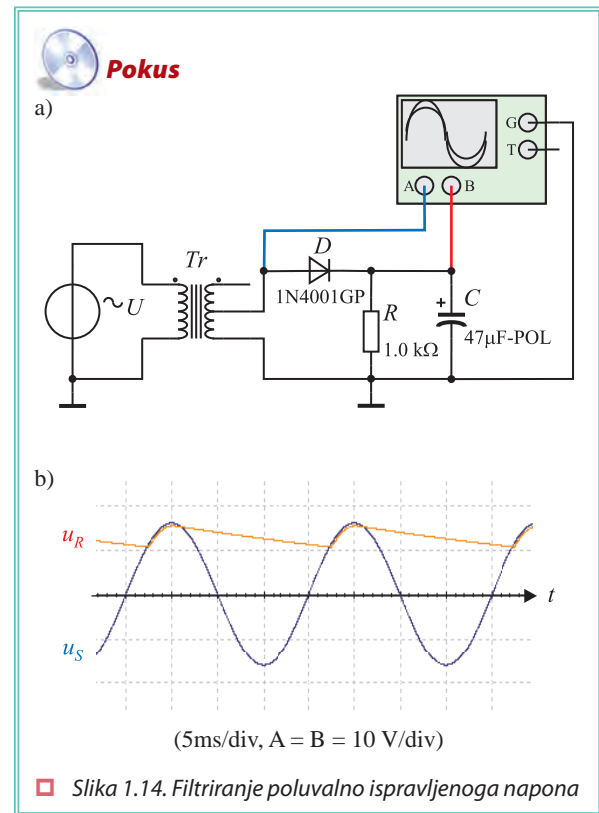


□ Slika 1.13. Ispravljač u jednom kućištu

Filtriranje ispravljenoga napona

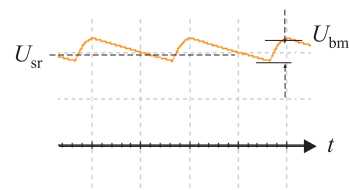
Izlazni napon otporno opterećenog ispravljača ima veliku **valovitost**, tj. uz istosmjernu komponentu sadrži jako izraženu izmjeničnu komponentu, tzv. **napon brujanja** (engl. ripple, njem. Brummspannung). Takav napon nije pogodan za napajanje elektroničkih sklopova. Poboljšanje oblika izlaznoga napona (povećanje

istosmjerne komponente uz smanjenje valovitosti) dobije se postupkom filtriranja (glađenja) ispravljenoga napona. Za filtriranje ispravljenoga napona najčešće se upotrebljavaju kondenzatori velikoga kapaciteta (slika 1.14.).



□ Slika 1.14. Filtriranje poluvalno ispravljenoga napona

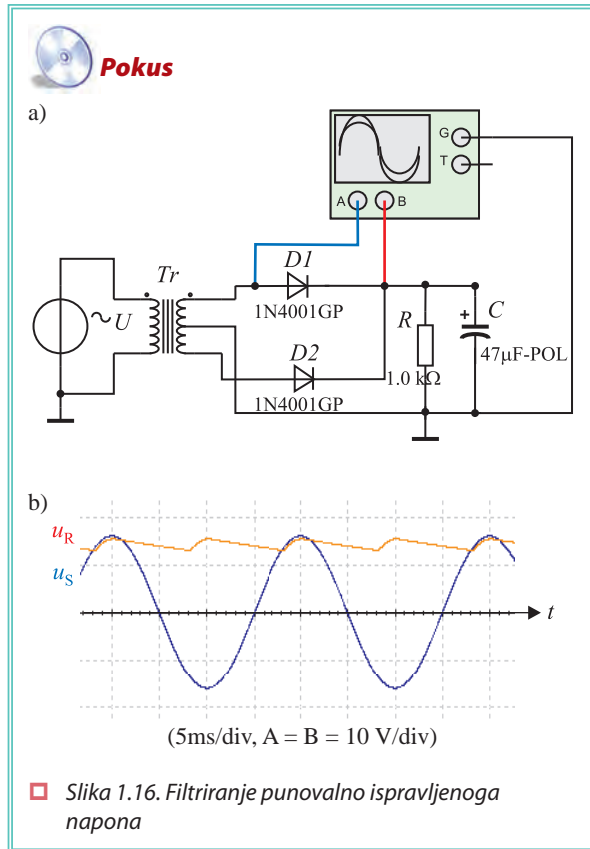
Dioda vodi samo dok je anoda pozitivnija od katode. U tome dijelu periode izmjeničnoga napona kondenzator se nabija. U ostalome dijelu periode dioda je zaporno polarizirana. Struju trošilu daje nabijeni kondenzator pa se napon na njemu smanjuje. Što je opterećenje veće, bit će znatnije smanjenje izlaznoga napona. Da se to spriječi, potrebno je primijeniti kondenzatore velikoga kapaciteta.



□ Slika 1.15. Napon brujanja

Iznos napona brujanja U_{bm} (mjereno od vrha do vrha, slika 1.15.) ovisi o vršnoj vrijednosti ispravljenoga napona (približno jednaka vršnoj vrijednosti napona na sekundarnom namotu transformatora $U_{Sm\max}$), o frekvenciji napona brujanja f_b (za poluvalni ispravljač $f_b = 50$ Hz, za punovalni ispravljač $f_b = 100$ Hz), o opterećenju ispravljača R i kapacitetu kondenzatora za glađenje C :

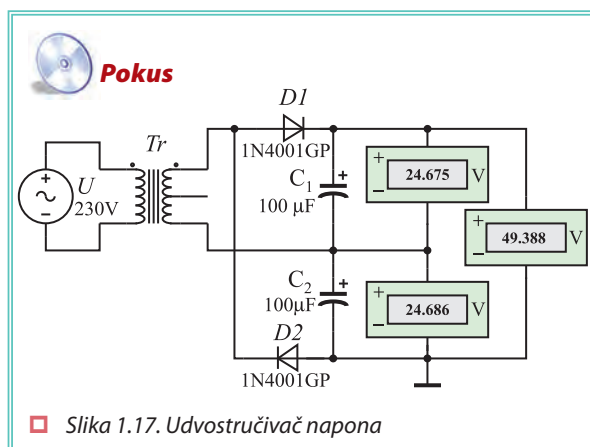
$$U_{bm} = \frac{U_{Sm}}{f_b RC}.$$

**Primjer 1.2.**

Izračunati napon brujanja ispravljača sa slike 1.16. ako je prijenosni omjer transformatora 10:1, $C = 100 \mu\text{F}$ i $R = 1 \text{ k}\Omega$.

$$U_{sm} = \frac{\sqrt{2} \cdot 230}{2 \cdot 10} = 16,26 \text{ V}$$

$$U_{bm} = \frac{16,26}{100 \cdot 1 \cdot 10^3 \cdot 100 \cdot 10^{-6}} = 1,626 \text{ V}$$

Udvostručivač napona

Ako su na sekundarni namot transformatora spojena dva poluvalna ispravljača opterećena kapacitivnim opterećenjem, s time da diode vode naizmjenično, tada do-

bivamo sklop koji na izlazu daje napon dvostruko viši od napona dobivenog jednim poluvalnim ispravljačem. To je tzv. **udvostručivač napona** ili Delonov, odnosno Greinacherov spoj (slika 1.17.).

Za vrijeme pozitivne poluperiode sekundarnog napona u_s vodi dioda $D1$, kondenzator C_1 se nabija, dok se za vrijeme negativne poluperiode nabija C_2 preko diode $D2$. Uz zanemarivanje pada napona na diodama, dobiveni istosmjerni napon na svakom kondenzatoru bit će jednak vršnoj vrijednosti napona sekundara U_{Smax} , te će ukupni napon između točaka 1 i 2 biti:

$$U_{iz} = 2 U_{Smax}.$$

Prednost ovog sklopa je u tome što se pri niskom naponu na sekundarnom namotu transformatora može dobiti visoki istosmjerni napon.

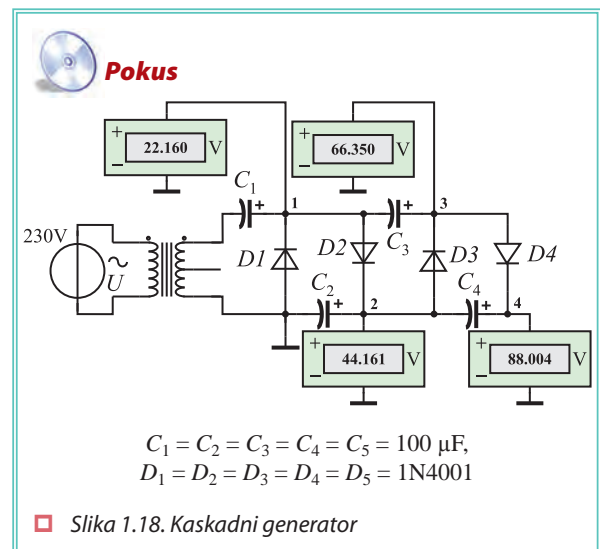
Primjer 1.3.

Ako efektivna vrijednost napona na sekundaru iznosi 200 V, koliki će biti napon na izlazu sklopa sa slike 1.17.?

$$U_{iz} = 2 \sqrt{2} U_{ef} = 2 \times \sqrt{2} \times 200 = 564 \text{ V}$$

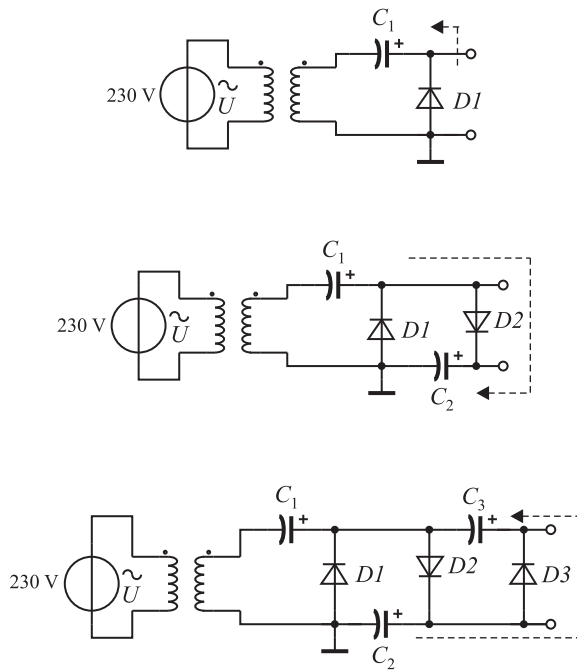
Umnoživač napona

Za dobivanje istosmjernih napona na sekundaru, koji su jednaki parnim ili neparnim višekratnicima napona, upotrebljava se tzv. **kaskadni generator** ili Cockroft-Waltonov, odnosno Greinacherov spoj (slika 1.18.).



Za vrijeme jedne poluperiode napona na sekundaru transformatora preko diode $D1$ nabija se kondenzator C_1 na napon $U_{c1} = U_{smax}$ (slika 1.19.a). Za vrijeme iduće poluperiode dioda $D1$ je nepropusno polarizirana, a $D2$ je propusno polarizirana te se preko nje (slika 1.19.b) nabija kondenzator C_2 na napon:

$$U_{c2} = U_{c1} + U_{smax} = 2 U_{smax}.$$



□ Slika 1.19. Prikaz načela rada kaskadnoga generatora

Kondenzator C_1 se pri tome djelomično izbija. Kondenzator C_3 nabije se preko propusno polarizirane diode D_3 strujnim krugom transformator- C_2 - D_3 - C_3 - C_1 -transformator (slika 1.19.c) na napon:

$$U_{c3} = U_{\text{smax}} + U_{c2} - U_{c1},$$

$$U_{c3} = U_{\text{smax}} + 2U_{\text{smax}} - U_{\text{smax}} = 2U_{\text{smax}}.$$

C_2 se djelomično izbija, a C_1 se opet nabija preko vodljive diode D_1 . Na isti način je:

$$U_{c4} = U_{\text{smax}} + U_{c1} + U_{c3} - U_{c2} = 2U_{\text{smax}}.$$

Dakle, svaki se kondenzator, osim kondenzatora C_1 , nabije na napon jednak dvostrukoj amplitudi napona na sekundarnom namotu transformatora, te se sa svake strane naponi kondenzatora zbrajaju. Tako se na granama označenim neparnim brojevima dobiju neparni, a na granama označenima parnim brojevima parni višekratnici napona U_{smax} . Tako se u točki 3 dobije vrijednost napona $3U_{\text{smax}}$, a u točki 4 $4U_{\text{smax}}$ itd.

Prednost ovog spoja je što se s pomoću elemenata za male napone (dioda i kondenzatora) može dobiti relativno veliki istosmjerni napon. Upotrebljava se samo kao izvor napona jer pri većem opterećenju napon pada pošto se kondenzatori ne stignu dopuniti.

1.3. DIODNI OGRANIČAVAČI I RESTAURATORI

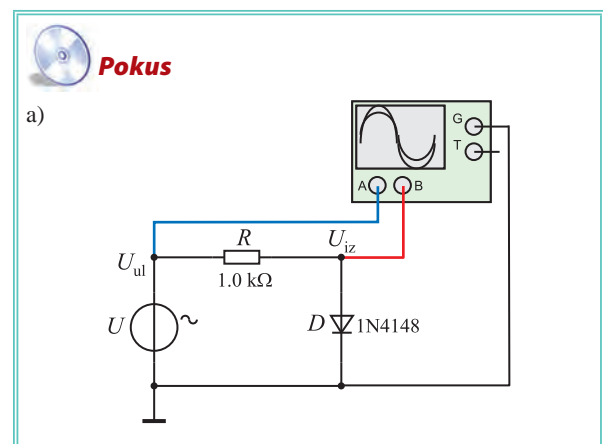
U elektronici je često potrebno ograničiti porast napona iznad određene vrijednosti. Sklopovi koji obavljaju tu funkciju nazivaju se ograničavači (engl. clipping circuits, limiting circuits, skraćeno clippers, odnosno limiters, njem. Begrenzerschaltung).

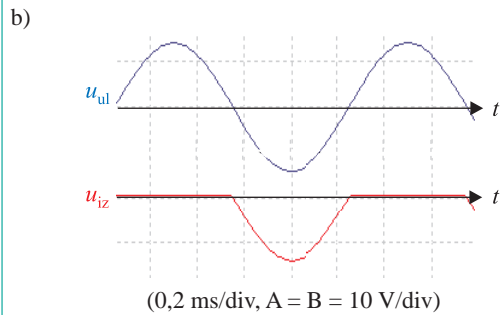
Neki električni i elektronički sklopovi imaju svojstvo da signalima oduzimaju istosmjernu komponentu (npr. RC-mreža). Kad je potrebno obnoviti (uspostaviti) istosmjernu komponentu, upotrebljavaju se restauratori (engl. restorer, njem. Klemmschaltung).

Paralelni diodni ograničavač

Na slici 1.20. pokazan je spoj diode i otpornika koji ograničava porast izlaznoga napona za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznoga napona. Kako je dioda spojena paralelno izlazu, spoj se naziva paralelni ograničavač.

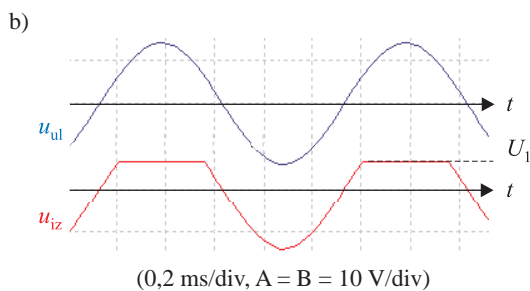
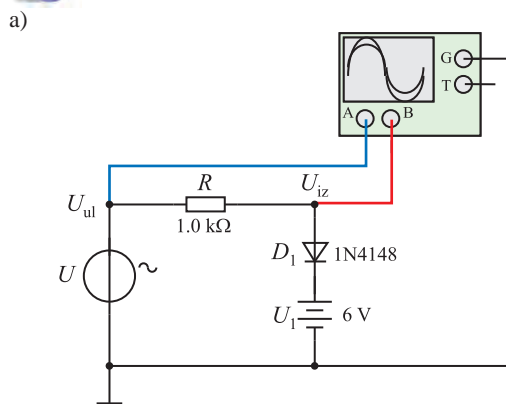
Za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznoga napona dioda je vodljiva pa je na izlazu mali napon propusne polarizacije diode U_F . Za vrijeme negativne poluperiode dioda je nevodljiva pa se ulazni napon prenosi na izlaz.





□ Slika 1.20. Ograničavanje napona diodom

Pokus



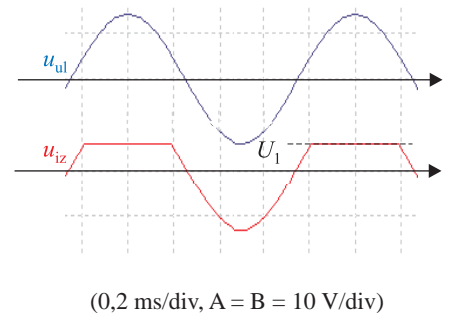
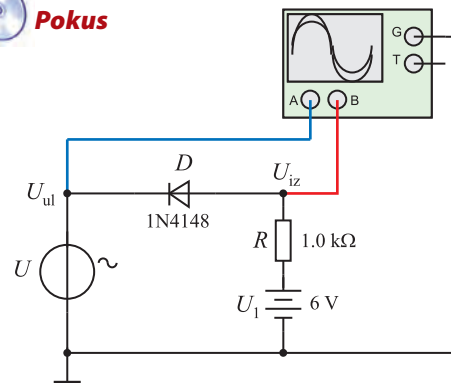
□ Slika 1.21. Paralelni diodni ograničavač

Ako se želi porast izlaznog napona ograničiti na neku vrijednost veću od U_F , dodaje se u seriju s diodom izvor napona U_1 (slika 1.21.). Dioda postaje vodljiva kad je ulazni napon veći od napona U_1 uvećanoga za pad napona na propusno polariziranoj diodi. Tada je na izlazu približno napon U_1 (točnije $U_1 + U_F$).

Serijski diodni ograničavač

Isti učinak može se postići serijskim diodnim ograničavačem. Ulazni napon prenosi se na izlaz kad je dioda vodljiva, tj. kad je ulazni napon manji od napona U_1 . U protivnom je na izlazu napon U_1 dodanoga istosmjernog izvora (slika 1.22.).

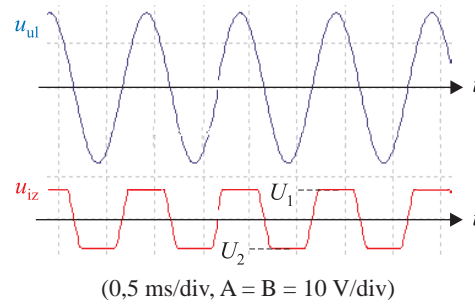
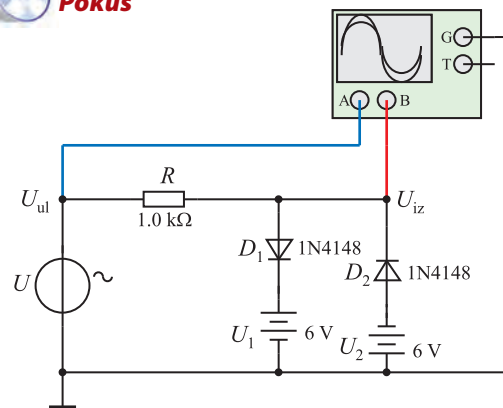
Pokus



□ Slika 1.22. Serijski diodni ograničavač

Dvostrani ograničavač

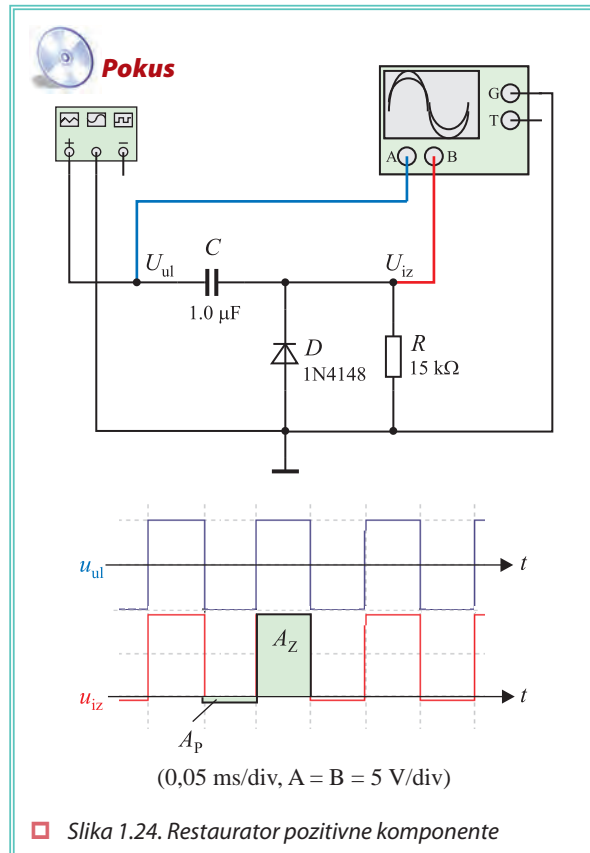
Pokus



□ Slika 1.23. Dvostrani paralelni ograničavač

Kad je potrebno ograničiti napon na dvije razine, upotrebljavaju se dvostrani paralelni ograničivači (slika 1.23.). Za vrijeme pozitivne poluperiode ulaznoga napona vodi dioda $D1$ kad ulazni napon ima vrijednost veću od U_1 . Tada je na izlazu napon U_1 . Za vrijeme negativne poluperiode ulaznoga napona vodi dioda $D2$ kad ulazni napon ima manju vrijednost od U_2 . Tada je na izlazu napon U_2 .

Restauratori



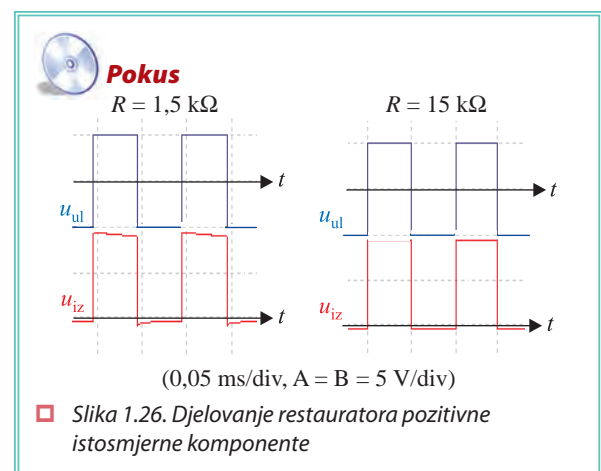
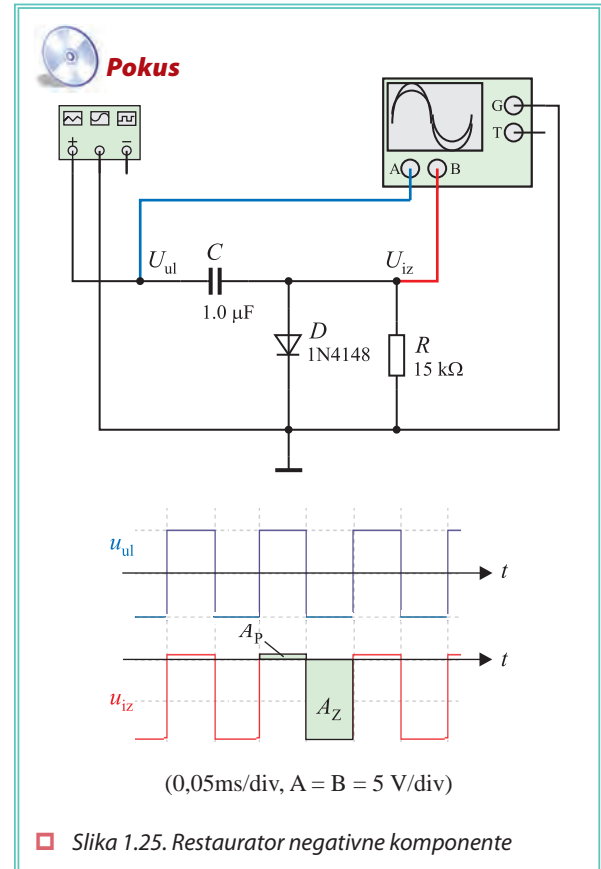
Pokus sa slike 1.24. pokazuje djelovanje restauratora koji obnavlja pozitivnu istosmjernu komponentu. Pokus sa slike 1.25. pokazuje djelovanje restauratora koji obnavlja negativnu istosmjernu komponentu.

Izlazni napon restauratora nije u potpunosti samo pozitivan, odnosno samo negativan. Uzrok tome je odstupanje svojstava diodne sklopke od onih za idealnu sklopku.

Površina koju izlazni napon zatvara s vremenskom osi u vremenu kad je dioda propusno polarizirana prema površini koju izlazni napon zatvara s vremenskom osi u vremenu kad je dioda zaporno polarizirana, odnosi se kao otpor propusno polarizirane diode r_d prema otporu R (slika 1.24. i 1.25.).

$$\frac{A_p}{A_z} = \frac{r_d}{R}$$

Iz toga proizlazi da bi otpor R trebao biti što veći u usporedbi s otporom propusno polarizirane diode. Međutim, povećanje otpora R ograničeno je iznosima otpora zaporno polarizirane diode. Pokus sa slike 1.26. pokazuje djelovanje restauratora uz različite vrijednosti otpora R .



1.4. OSTALE VRSTE DIODA

Od ostalih vrsta dioda u ovom dijelu prvoga poglavlja dan je prikaz svojstava i osnovne primjene Zenerove, tunelske i kapacitivne diode.

Zenerova dioda

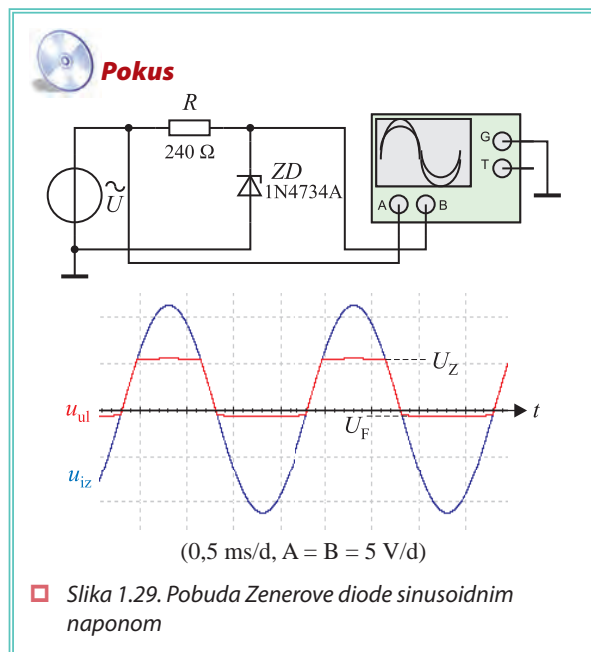
Zenerova dioda je silicijska dioda kod koje se primjenjuje svojstvo da kod Zenerova (lavinskog) proboja održava stalan napon, praktički neovisan o struji kroz diodu.



□ Slika 1.27. Simboli Zenerove diode

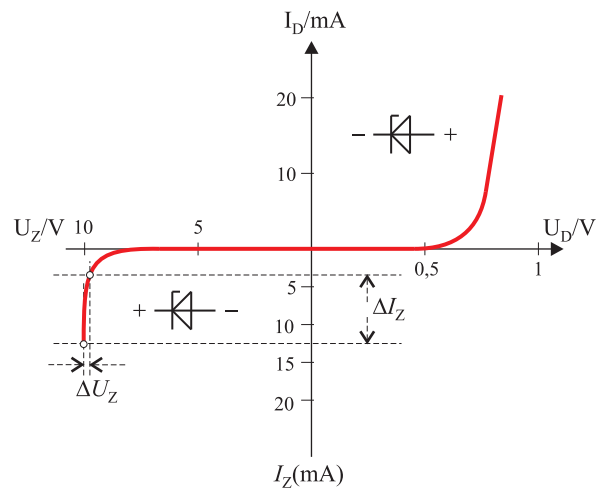


□ Slika 1.28. Primjeri izvedbi Zenerovih dioda



U pokusu na slici 1.29. na ulaz sklopa spojen je promjenljivi sinusoidni napon. Kad je ulazni napon negativan, Zenerova dioda je propusno polarizirana i na njoj je mali napon $-U_F$. Uz pozitivni ulazni napon manji

od napona U_Z dioda je zaporno polarizirana i na njoj je napon izvora. Kad iznos ulaznoga napona zadobije vrijednost veću od U_Z , dioda prelazi u stanje lavinskoga proboja i na njoj je stalan napon U_Z .



□ Slika 1.30. Strujno-naponska karakteristika Zenerove diode

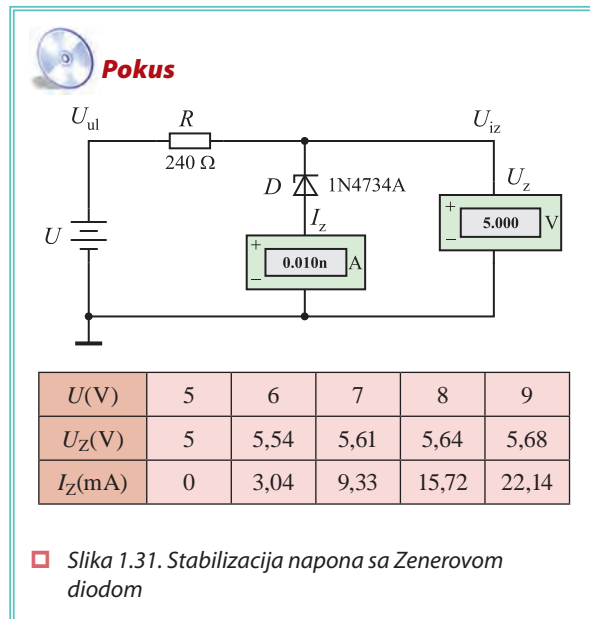
Vrijednosti probojnoga napona Zenerovih dioda može se kontrolirati u tijeku procesa proizvodnje. To omogućuje da se proizvode diode s probojnim naponima od nekoliko volta do nekoliko stotina volta. Dioda s probojnim naponom manjim od 5 V nemaju oštro izražen probojni napon. Dioda s probojnim naponom ispod 5 V imaju negativan temperaturni koeficijent (s porastom temperature smanjuje se Zenerov napon). Dioda sa Zenerovim naponom višim od 5 V imaju pozitivan temperaturni koeficijent (s porastom temperature raste Zenerov napon).

Dioda s većim probojnim naponom imaju veći unutarnji otpor. Unutarnji otpor Zenerove diode jest omjer promjene napona na diodi i promjene struje kroz diodu koja je dovela do promjene napona:

$$r_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z}$$

Zenerove diode upotrebljavaju se kao stabilizatori i ograničavači napona. Prilikom odabira Zenerovih dioda potrebno je voditi računa o najvećoj dopuštenoj struji diode u Zenerovu području I_Z , odnosno o dopuštenu utrošku snage. Iznosi dopuštenih utrošaka snage kreću se od nekoliko stotina milivata do nekoliko desetaka vata.

Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom



Primjer uporabe Zenerove diode pokazan je na slici 1.31. Riječ je o najjednostavnijoj izvedbi stabilizatora napona. Izlazni je napon ovoga stabilizatora Zenerov napon U_Z . Kako promjene struje I_Z neznatno mijenjaju napon U_Z , izlazni napon može se smatrati stalnim. Promjena ulaznoga napona uzrokuje promjenu struje Zenerove diode I_Z . Zato se mijenja pad napona na otporniku R , pa je izlazni napon gotovo konstantan.

$$U_{iz} = U_u - I \times R = U_Z,$$

$$I = I_Z + I_p = I_Z + \frac{U_Z}{R_p}.$$

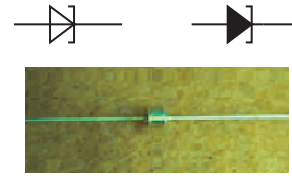
Otpornik R služi za ograničenje struje Zenerove diode. Kad je stabilizator neopterećen, sva struja iz izvora teče kroz Zenerovu diodu pa otpornik R treba odabrati tako da ta struja ne prelazi dopuštenu vrijednost, kako ne bi došlo do oštećenja diode:

$$R = \frac{U_{ul} - U_Z}{I}.$$

No isto tako struja ne smije pasti ispod određene vrijednosti kad se počne smanjivati napon na diodi. Za siguran rad stabilizatora ulazni napon treba biti veći od izlaznoga oko dva puta.

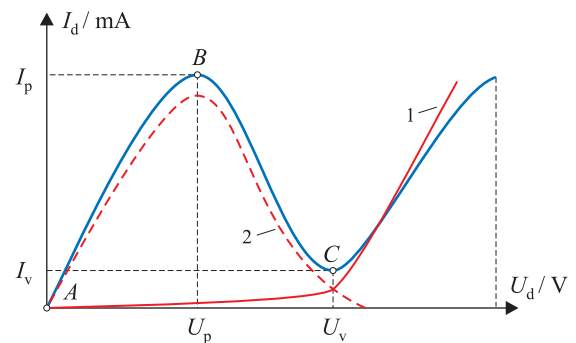
Tunelska dioda

Tunelska dioda ili **Esakijeva dioda** (prema japanskom fizičaru Leu Esakiju koji je prvi teoretski obradio tunelsku diodu) poluvodički je element na bazi germanija ili galij-arsenida s vrlo tankim i jako dopiranim PN spojem.



□ Slika 1.32. Simboli i primjer izvedbe tunelske diode

Na tako uskoj PN barijeri javlja se **efekt tuneliranja**, tj. elektroni i šupljine prolaze (tuneliraju) kroz barijeru (uz uvjet da se nalaze na istom energetskom nivou). Tada kroz diodu teče osim **difuzione struje** (krivulja 1) i **struja tuneliranja** (krivulja 2 sa slike 1.33.). Ta struja naglo raste kod malih napona u propusnom smjeru (točke A do B), a zatim opada s porastom napona (B do C). To je tzv. područje **negativnog otpora**, gdje se javlja efekt suprotan Ohmovu zakonu, tj. porastom napona struja se smanjuje. Od točke C nadalje dioda se ponaša kao poluvodička propusno polarizirana dioda.



□ Slika 1.33. Karakteristika tunelske diode

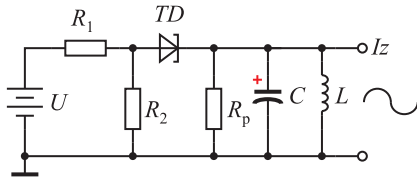
Ako se dioda upotrebljava kao sklopka, radna točka se mora nalaziti na karakteristici u području između točaka A i B, ili iza točke C. Karakteristični naponi, odnosno struje su napon vrha U_p (engl. peak voltage) i struja vrha I_p (engl. peak current), te napon dna U_v (engl. valley voltage) i struja dna I_v (engl. valley current). Karakteristične veličine ovise o vrsti poluvodičkog materijala što je prikazano tablicom 1.1. Maksimalna struja I_p kreće se u rasponu od $100 \mu\text{A}$ do više od 10 A , a odnos I_p/I_v od 5 do 10. Najbolje vrijednosti daje GaAs.

□ Tablica 1.1. Karakteristične veličine tunelskih dioda

Materijal	Naponi		
	U_p / mV	U_v / mV	U_f / mV
Ge	55	350	500
Si	75	450	750
GaAs	150	500	1200

Tunelska dioda nalazi primjenu u VF tehnici, ali ograničenu zbog nemogućnosti upravljanja vanjskim signalom. Veću primjenu nalazi u oscilatorima za rad na visokim frekvencijama do desetak GHz. Primjer jednostavnog oscilatora pokazuje slika 1.34. U serijskom spoju tunnel diode (radna točka se nalazi u sredini ka-

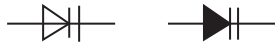
rakteristike dijela negativnog otpora) i titrajnog kruga R_p - C - L na izlazu dobivamo konstantan sinusoidni signal.



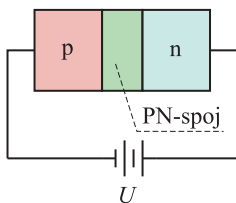
□ Slika 1.34. Primjena tunelske diode

Kapacitivna dioda

Kapacitivna dioda ili **varikap dioda** (varaktor) je dioda kod koje se kapacitet mijenja s promjenom napona.



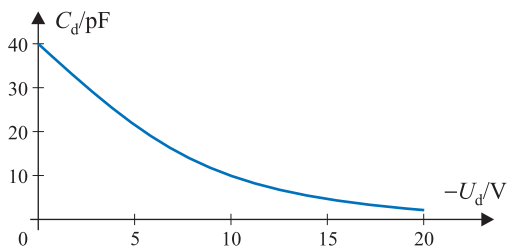
□ Slika 1.35. Simboli kapacitivne diode



□ Slika 1.36. Građa kapacitivne diode

Upotrebljava se u području zaporne polarizacije PN spoja, gdje PN spoj djeluje kao dielektrik kondenzatora, jer kroz njega pri zapornoj polarizaciji ne teče struja, a P i N tip poluvodiča djeluju kao njegove ploče (slika 1.36.). Kada PN spoj nije priključen na napon napajanja, područje PN barijere ima određenu širinu, a time i početni kapacitet $C_{poč}$. Jače dopirani PN spoj ima užu barijeru, a time i veći $C_{poč}$.

Priključkom izvana dodanog napona $-U_d$ proširuje se područje barijere, a time se kapacitet diode C_d smanjuje. On je najmanji kada se $-U_d$ približi probnoj vrijednosti PN spoja, koja iznosi oko 40 V (vidljivo iz karakteristike na slici 1.37.).



□ Slika 1.37. Ovisnost kapaciteta diode o zapornom naponu

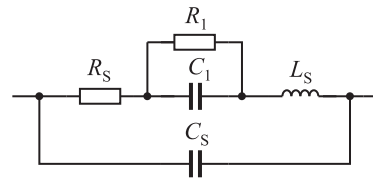
Najvažniji podaci kapacitivnih dioda, potrebni za praktičnu primjenu, i njihove tipične vrijednosti za primjer izvedbe sa slike 1.38. pokazani su u tablici 1.2.



□ Slika 1.38. Primjeri izvedbe kapacitivne diode

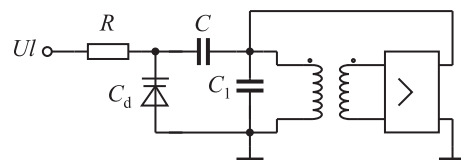
□ Tablica 1.2. Karakteristične vrijednosti za primjer izvedbe kapacitivne diode

dopušteni zaporni napon	12 V
dopuštena struja zaporne polarizacije	250 mA
dopušteni utrošak snage	400 mW
serijski induktivitet	6 nH
faktor dobrote ($U_R = 2V$)	200
kapacitet ($C = C_J + C_S$)	10-200 pF



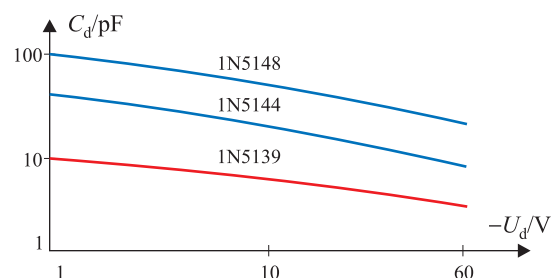
□ Slika 1.39. Nadomjesni spoj kapacitivne diode

Kapacitivne diode se upotrebljavaju za ugađanje titrajnih krugova te za automatsku regulaciju frekvencije u radiotelevizijskoj tehnici. Primjer sa slike 1.40. pokazuje primjenu kapacitivne diode u stupnju za podešavanje frekvencije, a što se koristi kod sinkronizacije rada oscilatora. Promjenom frekvencije oscilatora dolazi do promjene napona regulacije dobivenog fazno-frekvencijskim komparatorom koji djeluje na kapacitivnu diodu. Taj napon mijenja kapacitet diode C_d , a time i ukupan kapacitet titrajnog kruga čime se podešava frekvencija.



□ Slika 1.40. Primjena kapacitivne diode

Karakteristike nekih kapacitivnih dioda dane su slikom 1.41.



□ Slika 1.41. Karakteristike kapacitivnih dioda

PREGLED KLJUČNIH POJMOVA

- dioda opće namjene** (ispravljačka dioda) - elektronički element s dvije elektrode (anoda i katoda) koji ima svojstvo da u jednome smjeru propušta struju, a u drugom ne
- efekt tuneliranja** - prolazak elektrona i šupljina kroz PN barijeru uz uvjet da se nalaze na istoj energetskej razini, posljedica je postojanje **difuzione struje** i **struje tuneliranja**
- gladenje** (filtriranje) - postupak smanjenja napona brujanja izlaznoga napona ispravljača
- kapacitivna dioda** (varikap dioda, varaktor) - dioda kod koje se kapacitet mijenja s promjenom napona
- karakteristika negativnog otpora** - područje rada elektroničkoga elementa u kojemu se porastom napona struja smanjuje
- kaskadni generator** (Cockroft-Waltonov, odnosno Greinacherov spoj) - sklop za dobivanje istosmjernih napona jednakih parnim ili neparnim višekratnicima napona na sekundaru transformatora
- mosni spoj ispravljača** - punovalni spoj ispravljača s četiri diode
- napon brujanja** (valovitost) - izmjenična komponenta izlaznoga napona ispravljača
- napon praga** ili **napon koljena** U_T - napon propusne polarizacije kod kojega dioda postaje vodljiva
- ograničavači** - sklopovi kojima se ograničava porast napona iznad određene vrijednosti
- poluvalni spoj ispravljača** - najjednostavniji ispravljački spoj u kojemu dioda propušta struju samo za vrijeme jedne poluperiode izmjeničnoga napona
- probojni napon** U_{BR} - napon zaporne polarizacije kod kojega dolazi do nagloga porasta reverzne struje i proboja diode
- propusna struja** I_F - struja koja teče kroz diodu kada je propusno polarizirana, tj. anoda pozitivnija od katode
- punovalni spoj ispravljača** u spoju s dvije diode - spoj ispravljača u kojemu je za vrijeme pozitivne poluperiode napona na sekundaru transformatora vodljiva jedna dioda, a za vrijeme negativne poluperiode druga dioda pa struja teče kroz trošilo uvijek u istomu smjeru u obje poluperiode
- reverzna struja** I_R - struja koja teče kroz diodu kad je zaporno polarizirana, tj. kad je katoda na pozitivnijemu potencijalu od anode
- restauratori** - sklopovi kojima se signalima obnavlja istosmjerna komponenta
- tunelska dioda** (Esakijska dioda) - poluvodički elemenat na bazi germanija ili galij-arsenida sa vrlo tankim i jako dopiranim PN spojem i karakteristikom negativnoga otpora
- udvostručivač napona** (Delonov, odnosno Greinacherov spoj) - sklop koji na izlazu daje napon dvostruko viši od napona dobivenog jednim poluvalnim ispravljačem
- Zenerove diode** - silicijske diode koje kod Zenerova (lavinskog) proboja imaju stalan napon, praktički neovisan o struji kroz diodu

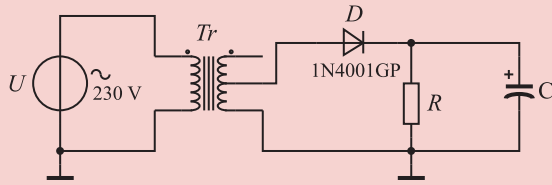


DODATNA LITERATURA ZA UČENIKE

- P. Biljanović**, *Poluvodički elektronički elementi* (6. Poluvodičke pn-diode), Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- T. Brodić**, *Elektronički elementi i osnovni sklopovi* (6. Poluvodičke diode, 7. Zenerove diode, 16. Neupravljivi ispravljači), Školska knjiga, Zagreb, 1995.
- A. Szabo**, *Industrijska elektronika* (8. Ispravljački spojevi, 9. Osnovni spojevi ispravljača, 9. Gladenje ispravljenoga napona), Tehnička škola Ruđera Boškovića, Zagreb, 1975.
- A. Šarčević**, *Elektroničke komponente i analogni sklopovi* (2. Poluvodička dioda), Tehnička škola Ruđera Boškovića, Zagreb, 1987.

ZADATCI ZA LABORATORIJSKE VJEŽBE

Vježba 1.1. Poluvalni ispravljač



□ Slika 1.42. Poluvalni ispravljač

Priprema

1. Navedite najveći dopušteni zaporni napon i najveću dopuštenu struju pri propusnoj polarizaciji za diodu 1N4007.
2. Izračunajte srednju vrijednost ispravljenoga napona ispravljača sa slike 1.42. bez spojenoga kondenzatora C uz napon na sekundarnom namotu transformatora $U_S = 24$ V.
3. Izračunajte napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 1.42. uz $C = 100 \mu\text{F}$ ako je napon na sekundarnom namotu transformatora $U_S = 24$ V.
4. Nacrtajte shemu spoja poluvalnog ispravljača (slika 1.42.) s ucrtanim instrumentima za mjerenje izlazne struje te izlaznoga napona i napona brujanja.

Pokusi

1. Ispitivanje ovisnosti izlaznoga napona o kapacitetu kondenzatora za gladenje

1.1. Namjestite izlazni napon iz regulacijskoga transformatora na 24 V. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente sklopa i instrumente te priključite ulazni napon.

Izmjerite pad napona U_R i struju I_R kroz otpor $R = 1 \text{ k}\Omega$ za vrijednosti kapaciteta kondenzatora C : 47 μF , 100 μF i 470 μF . Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

1.2. Osciloskopom ustanovite oblike ulaznoga i izlaznoga napona poluvalnog ispravljača za vrijednosti kapaciteta kondenzatora za gladenje C : 47 μF , 100 μF i 470 μF . Izmjerite napon brujanja za svaki zadani kapacitet kondenzatora.

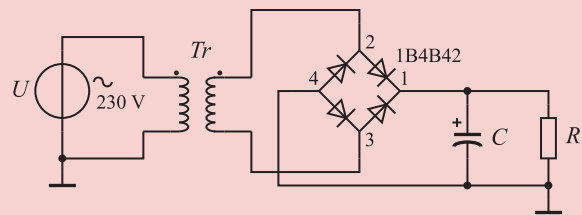
2. Ispitivanje ovisnosti izlazne struje, izlaznoga napona i valovitosti o otporu potrošača

2.1. Namjestite izlazni napon regulacijskoga transformatora na 24 V. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente i priključite napon napajanja.

Izmjerite izlazni napon i struju kroz otpor R za vrijednosti otpora 100 Ω , 470 Ω i 1 $\text{k}\Omega$. Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

2.2. Osciloskopom ustanovite oblik ulaznoga i izlaznoga napona i izmjerite iznos napona brujanja za zadane vrijednosti otpora opterećenja R iz točke 2.1.

Vježba 1.2. Punovalni ispravljač



□ Slika 1.43. Punovalni ispravljač

Priprema

1. Navedite najveći dopušteni zaporni napon i najveću dopuštenu struju pri propusnoj polarizaciji za diodu 1N4007.
2. Izračunajte srednju vrijednost ispravljenoga napona ispravljača sa slike 1.43. bez spojenoga kondenzatora C uz napon na sekundarnom namotu transformatora $U_S = 24$ V.
3. Izračunajte napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 1.43. ako je napon na sekundarnome namotu transformatora $U_u = 24$ V.
4. Nacrtajte shemu spoja punovalnog ispravljača (slika 1.43.) s ucrtanim instrumentima za mjerenje izlazne struje te izlaznoga napona i napona brujanja.

Pokusi

1. Ispitivanje ovisnosti izlazne struje i napona te valovitosti o kapacitetu kondenzatora za gladenje

1.1. Namjestite izlazni napon iz regulacijskoga transformatora na 24 V. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente sklopa i instrumente te priključite ulazni napon.

Izmjerite pad napona U_R i struju I_R kroz otpor $R = 1 \text{ k}\Omega$ za vrijednosti kapaciteta kondenzatora C : 47 μF , 100 μF i 470 μF . Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

1.2. Osciloskopom ustanovite oblike ulaznoga i izlaznoga napona poluvalnog ispravljača za vrijednosti

kapaciteta kondenzatora za gladeenje C : 47 μF , 100 μF i 470 μF . Izmjerite napon brujanja za svaki zadani kapacitet kondenzatora.

2. Ispitivanje ovisnosti izlazne struje i napona te valovitosti o otporu potrošača

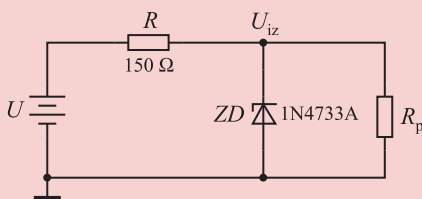
2.1. Namjestite izlazni napon regulacijskoga transformatora na 24 V. Prema nacrtanoj shemi povežite elemente i priključite napon napajanja.

Izmjerite izlazni napon i struju kroz otpor R za vrijednosti otpora 100 Ω , 470 Ω i 1 k Ω . Rezultate mjerenja prikažite tablicom.

2.2. Osciloskopom ustanovite oblik ulaznoga i izlaznoga napona i izmjerite iznos napona brujanja za zadane vrijednosti otpora opterećenja R iz točke 2.1.

Vježba 1.3. Stabilizacija napona sa Zenerovom diodom

Priprema



□ Slika 1.44. Stabilizator s diodom 1N4733

1. Navedite Zenerov napon, dopuštenu struju i dopušteni utrošak snage za diodu 1N4733.

2. Nacrtajte shemu stabilizatora sa Zenerovom diodom prema slici 1.44. opterećenog otporom R_p i spojenim instrumentima za mjerenje ulaznoga i izlaznoga napona te struja kroz diodu i trošilo.

Pokusi

1. Ovisnost izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona

1.1. Povežite elemente stabilizatora i instrumente prema shemi. Na ulaz priključite izvor promjenljivoga istosmjernog napona i izmjerite vrijednosti izlaznoga napona te struje kroz diodu i trošilo za vrijednosti ulaznoga napona $U = 5 \text{ V}, 6 \text{ V}, 7 \text{ V}, 8 \text{ V}, 9 \text{ V}$ i 10 V.

1.2. Grafički prikažite ovisnost izlaznoga napona o promjenama ulaznoga napona.

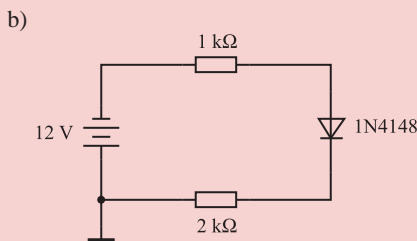
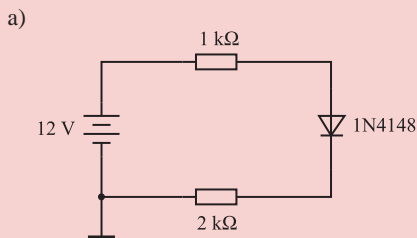
2. Ovisnost izlaznoga napona o promjenama struje opterećenja

2.1. Na ulaz stabilizatora priključite izvor istosmjernog napona 10 V i izmjerite vrijednosti izlaznoga napona te struje kroz diodu i trošilo za vrijednosti otpora $R_p = 330 \Omega, 470 \Omega, 680 \Omega$ i 1 k Ω .

2.2. Grafički prikažite ovisnost izlaznoga napona o promjenama opterećenja.

PITANJA I ZADATCI ZA PONAVLJANJE I PROVJERU ZNANJA

1. Kada se dioda može smatrati isključenom, a kada uključenom sklopkom?



□ Slika 1.45. Serijski spoj otpornika i diode

2. Koliko približno iznose jakosti struja kroz diode i padovi napona na diodi i otpornicima spoja dioda i otpornika sa slike 1.45.?

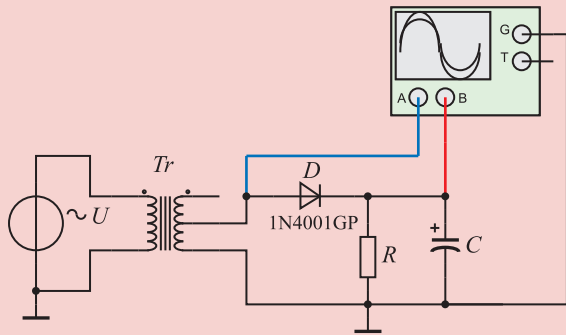
3. Kakav je utjecaj kapaciteta kondenzatora za gladeenje na iznos izlaznoga napona i struje ispravljača?

4. Kakav je utjecaj kapaciteta kondenzatora za gladeenje na iznos napona brujanja?

5. Kakav je utjecaj opterećenja na izlazni napon ispravljača?

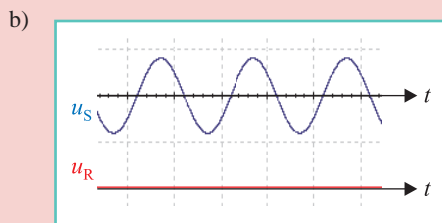
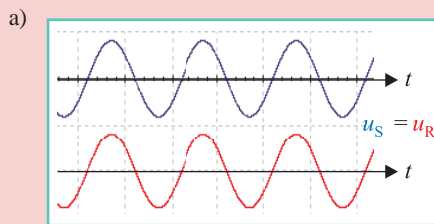
6. Kakav je utjecaj opterećenja na iznos napona brujanja?

7. Koliki treba biti kapacitet kondenzatora C da napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 1.42. ne bude veći od 500 mV uz napon 24 V na sekundarnom namotu transformatora i $R = 1 \text{ k}\Omega$?



□ Slika 1.46. Mjerenje na poluvalnom ispravljaču

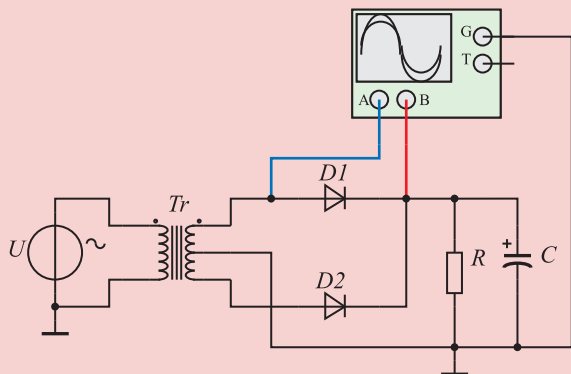
8. Mjerenjem napona prema slici 1.46. dobiven je napon pokazan na slici 1.47.a. Koja je komponenta u kvaru?
9. Mjerenjem napona prema slici 1.46. dobiven je napon pokazan na slici 1.47.b. Koja je komponenta u kvaru?



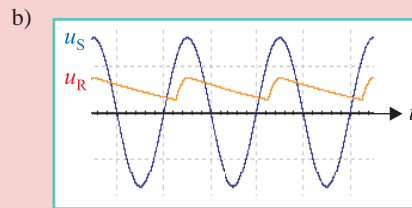
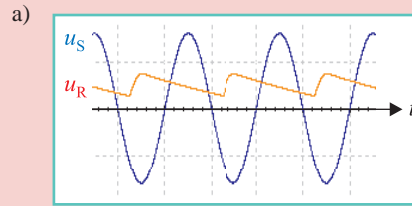
(u_S je napon na sekundaru transformatora)

□ Slika 1.47. Oscilogrami napona na neispravnomu ispravljaču

10. Koliki treba biti kapacitet kondenzatora C da napon brujanja izlaznoga napona ispravljača sa slike 1.43. ne bude veći od 500 mV uz napon 24 V na sekundarnom namotu transformatora i $R = 1 \text{ k}\Omega$?



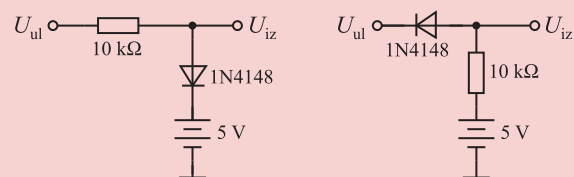
□ Slika 1.48. Mjerenje na punovalnom ispravljaču



(u_S je napon na sekundaru transformatora)

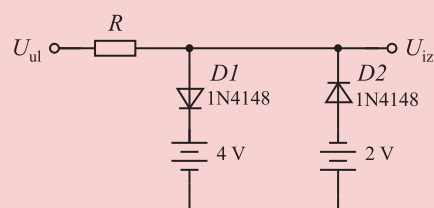
□ Slika 1.49. Oscilogrami napona na neispravnomu ispravljaču

11. Mjerenjem napona prema slici 1.48. dobiven je napon pokazan na slici 1.49.a. Koja je komponenta u kvaru?
12. Mjerenjem napona prema slici 1.48. dobiven je napon pokazan na slici 1.49.b. Koja je komponenta u kvaru?
13. Nacrtajte shemu spoja umnoživača napona sa 6 dioda, te odredite koliki napon se dobije takvim umnoživačem.
14. Izlazni napon umnoživača napona izvedenog sa četiri diode iznosi 620 V. Kolika je efektivna vrijednost napona na sekundaru transformatora koji napaja takav sklop?
15. Nacrtajte oblike izlaznoga napona diodnih ograničavača sa slike 1.50. pobuđenoga sinusoidnim naponom frekvencije 1 kHz i amplitude 6 V.



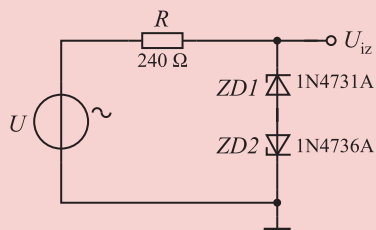
□ Slika 1.50. Diodni ograničavači

16. Usporedite međusobno djelovanje ograničavača sa slike 1.50.



□ Slika 1.51. Dvostrani diodni ograničavač

17. Nacrtajte oblike izlaznoga napona diodnog ograničavača sa slike 1.51. pobuđenoga sinusoidnim naponom frekvencije 1 kHz i amplitude 6 V.
18. Kako vrijednost otpora R restauratora utječe na njegovo djelovanje i oblik izlaznoga napona?
19. Opišite djelovanje stabilizatora sa Zenerovom diodom uz promjene struje opterećenja. Što je kritičnije za Zenerovu diodu, neopterećen ili kratko spojeni izlaz?



□ Slika 1.52. Spoj dvaju Zenerovih dioda

20. Kolika je vršna vrijednost struje kroz diode spoja sa slike 1.52. ako izlaz nije opterećen?
21. Kakav će biti izlazni napon spoja Zenerovih dioda prema slici 1.52. ako je na ulaz priključen izmjenični napon frekvencije 1 kHz i amplitude 10 V?
22. Usporedite svojstva tunelskih dioda za izvedbe s Ge, Si te GaAs.
23. Objasnite princip rada kapacitivne diode te usporediti karakteristike kapacitivnih dioda danih slikom 1.41.